

酸素借 (O_2 deficit) と酸素債 (O_2 debt) からみた運動の初期適応

石井 喜八*・安 義洙**

(昭和 58 年 2 月 3 月受理)

Initial Adaptation to Exercise from Viewpoint of Oxygen Deficit and Oxygen Debt

By Kihachi ISHII and Eue Soo ANN

From a view point of energy consumption, the aim of this study was to examine the initial adaptation to physical exercise and to discuss the mechanism of the faster adjustment.

Using bicycle ergometer (60 rpm), five subjects served with estimated, 40% and 60% $\dot{V}O_{2\max}$ and each subject was asked to try five trials of one, two, three, four and six-minute work, respectively.

For the discussion, the exercise intensity was classified into three levels: mild level (40%-50% $\dot{V}O_{2\max}$), moderate level (50%-60% $\dot{V}O_{2\max}$) and severe level (65%-75% $\dot{V}O_{2\max}$).

The results obtained were as follows.

1) The O_2 deficit cumulated at the same work intensity showed that the time-delay reached up a steady state and there was the levels due to the intensities.

2) As work intensity increased, the time occurred the peak value of O_2 debt was going to show latter and then the rate of increment in the O_2 debt was greater than in the O_2 deficit.

3) At initial stage during moderate exercise, physiological load against work intensity was not so hard.

4) Because of the production of blood lactate increasing with muscular work intensity, $\dot{V}O_2$, cardiac output and muscle blood flow are acceleratively increased. It seemed that an effect of acid base balance in vivo plays an important role at initial stage during exercise.

全身運動の開始に伴って交感神経系のはたらきは促進する。心拍数は上昇し、呼吸数・量が増加し、ときには皮膚血管の収縮が観察される。これらの変化とともに感覚の上では苦痛が伴い、呼吸困難や全身の疲労感をおぼえる。ときにはその結果として、運動成果 (performance) の低下をみることさえある^{1,4-6,10)}。この時期を死点 (dead point) と呼ぶ。さらにこの状態が続けると急に呼吸が楽になることが感ぜられ、ときには発汗を伴うことが観察され、運動が続けられるという。この状態を次息 (second wind) といっている。このようなことが生理書^{7,12)}に記載され、高等学校の保健体育の教科書の中にも採択されている。死点および次息の問題は心理・生理学的側面を有し、現代的に解明しようとしても仲々難しい課題である。真島¹²⁾は筋運動時の移行時の

全身的变化として位置づけ心理的側面を考慮している。また、全身運動に対する酸素摂取量の追従の過程を調べている研究^{8,9,15,17-19)}がみられる。ここでは心理的側面は考慮に入れていない。

本研究は、酸素借と酸素債の関係から運動負荷強度に伴う変化を運動開始時に焦点をあて考察することを目的としている。

方 法

1. 被検者

被検者は一般的に健康な男子学生 5 名であり、身体的特徴は表 1 に示す通りである。20 才代の 4 名の被検者は、現在では規則的なトレーニングをまったく行っていない。他の 19 才の被検者は 6 ヶ月前から運動グルー

* 身体動作学研究室

** 韓国成均館大学校

Table 1. Some physical characteristics of the subjects.

Subj.	Sex	Age (yr.)	Weight (kg)	Height (cm)	$\dot{V}O_{2\max}$ (ml/kg/min)
T. Y.	M	22	69.0	178	53.2
H. K.	M	19	66.5	173	48.5
H. W.	M	22	59.0	171	49.2
Y. M.	M	24	58.8	164	57.8
K. K.	M	23	77.5	175	44.9
Mean		22	66.2	172.2	50.7
SD		1.7	7.0	4.7	4.4

ブに所属し、毎日規則的な運動を続けている者である。

2. 運動負荷の設定

a) 最大酸素摂取量の測定

いくつかの運動負荷強度を決定するため、まず各被検者の最大酸素摂取量が測定された。この測定には自転車エルゴメーター（モナーク社製）が用いられた。その条件は 60 rpm で 0.5 kp/min の漸増負荷法である。

全身運動における初期適応の現象を観察するためには定常状態の発現する運動強度が望ましいと考えた。そこで、最大酸素摂取量の 40% と 60% に相当する負荷を課すことにした。この理由は一般にジョギングに用いられる強度を推定したものである。

b) 運動強度による群の再分類

運動に対する正味の酸素摂取量を求めるため基準線 (baseline) の安定を図る目的で安静時中 0 kp でペダリング運動を行なわせることにした。ここに於ても、自転車エルゴメーターの回転数は 60 rpm とした。そこで酸素値は、この基準線への回復までの量をもってあらわすことができる。

0 kp 運動 10 分間のうち、それぞれ 2 種類の負荷について 6 分間の運動が行なわれた。また、回復過程は、再び 0 kp で 30 分間のペダリング運動が行なわれた^{2,16)}。呼気ガス採集は負荷運動前の最後の 5 分間と運動中 1 分ごとに、そして回復過程は 5 分ごとに行なわれた。これらはすべてダグラスバッグ法によった。一方標本ガスを分析することによりそれぞれの酸素摂取量が求められた。

運動強度は予測値と実測値の間にはかなりの差異があらわれた (表 2)。そこで、資料整理の段階でこれらの負荷強度を再び群別し、分析を行なうことにした: 40%~48% $\dot{V}O_{2\max}$ の範囲の 4 試行を軽運動の強度 (mild level), 52%~65% $\dot{V}O_{2\max}$ の範囲の 3 試行を中等度の

Table 2. Observed (Ob.) work load.

Subj.	Estimated 40% $\dot{V}O_{2\max}$	Estimated 60% $\dot{V}O_{2\max}$
T. Y.	Ob. 40% $\dot{V}O_{2\max}$	Ob. 65% $\dot{V}O_{2\max}$
H. K.	Ob. 48% $\dot{V}O_{2\max}$	Ob. 75% $\dot{V}O_{2\max}$
H. W.	Ob. 52% $\dot{V}O_{2\max}$	Ob. 63% $\dot{V}O_{2\max}$
Y. M.	Ob. 48% $\dot{V}O_{2\max}$	Ob. 71% $\dot{V}O_{2\max}$
K. K.	Ob. 44% $\dot{V}O_{2\max}$	Ob. 72% $\dot{V}O_{2\max}$

強度の運動 (moderate level), 71%~75% $\dot{V}O_{2\max}$ の範囲の 3 試行を激運動の強度 (severe level) とした。

c) 目的とする実験の手順

運動開始以後の時間経過に伴う酸素借と酸素債の関係をみるために次のような実験手順が展開された。まず独立した 1 分間運動を行なわせ、運動中の酸素摂取量と酸素債を測定した、新たに 2 分間運動を行なわせ、この運動中および運動後の酸素摂取量が測定された。このように順次運動時間は 1 分間ずつ延長され、そのたびごとにそれらの運動中および運動後の酸素摂取量が測定された。回復過程の分析は、すべて 30 分間とした。課された運動時間は 4 分間までであったが先の定常状態を調べた 6 分間運動とともに 5 種類の分時運動が行われたことに

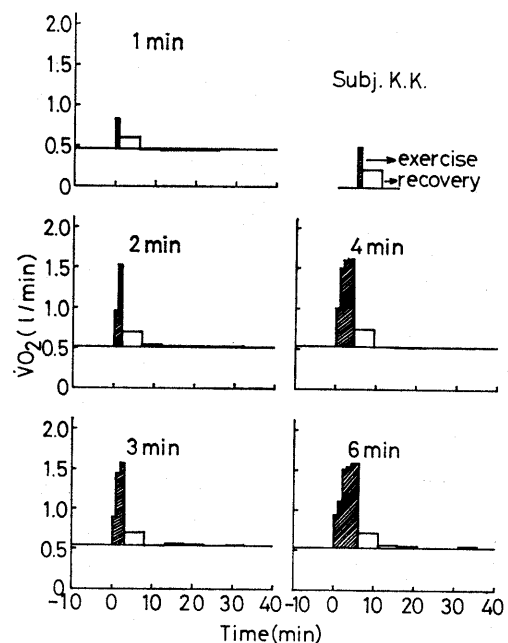


Fig. 1. O_2 consumption during and after each exercise.

Table 3.

Work intensity	Work load (% $\dot{V}O_{2\max}$)	Subj.	Each exercise (min)	$\dot{V}O_2$ measured during exercise (ml)	O_2 deficit (ml)	O_2 debt (ml)	Total O_2 cost for exercise (ml)	O_2 debt / O_2 deficit
Mild level	40% $\dot{V}O_{2\max}$	(T. Y.)	1	280	650	1000	1280	1.54
			2	1070	790	1050	2120	1.33
			3	2000	790	880	2800	1.11
			4	2930	790	740	3670	0.94
			6	4790	790	790	5580	1.00
	44% $\dot{V}O_{2\max}$	(K. K.)	1	358	699	710	1068	1.02
			2	1386	728	1200	2616	1.65
			3	2443	728	720	3163	0.99
			4	3500	728	870	4370	1.20
			6	5614	728	890	6504	1.22
	48% $\dot{V}O_{2\max}$	(H. K.)	1	464	536	580	1094	1.08
			2	1438	562	1170	2608	2.08
			3	2376	624	694	3070	1.11
			4	3376	624	820	4196	1.31
			6	5376	624	810	6186	1.30
	48% $\dot{V}O_{2\max}$	(Y. M.)	1	558	685	770	1328	1.12
			2	1672	750	940	2612	1.25
			3	2883	750	1160	4043	1.55
			4	4094	750	825	4984	1.10
			6	6516	750	890	7406	1.19
Moderate level	52% $\dot{V}O_{2\max}$	(H. W.)	1	416	637	700	1753	1.10
			2	1416	690	890	2996	1.29
			3	2469	690	1180	3649	1.71
			4	3522	690	810	4332	1.17
			6	5628	690	1020	7438	1.48
	63% $\dot{V}O_{2\max}$	(H. W.)	1	628	804	970	1598	1.21
			2	1960	904	1260	3220	1.39
			3	3392	904	1450	4842	1.60
			4	4824	904	1430	6254	1.58
			6	7688	904	1270	8958	1.40
	65% $\dot{V}O_{2\max}$	(T. Y.)	1	708	1027	1190	1898	1.16
			2	2248	1222	1240	3488	1.01
			3	3948	1257	1820	5760	1.45
			4	5683	1257	1570	7253	1.25
			6	9153	1257	1610	10763	1.28
Severe level	71% $\dot{V}O_{2\max}$	(Y. M.)	1	816	1140	1310	2126	1.15
			2	2442	1470	1540	4032	1.05
			3	4184	1684	1620	5804	0.96
			4	6140	1684	2320	8460	1.38
			6	10052	1684	1990	12042	1.18
	72% $\dot{V}O_{2\max}$	(K. K.)	1	712	1321	1470	2182	1.11
			2	2232	1834	1830	4062	1.00
			3	3922	2177	2320	6242	1.07
			4	5955	2177	2700	8655	1.24
			6	10021	2177	2777	12798	1.28
	75% $\dot{V}O_{2\max}$	(H. K.)	1	778	1083	1280	2058	1.18
			2	2438	1316	1540	3978	1.17
			3	4280	1351	1630	5910	1.21
			4	6157	1351	1880	8037	1.39
			6	9911	1351	1930	11841	1.43

なる。したがって、1名の被検者は、2つの運動強度が課されたため、計10試行が行われたことになる(図1)。

3. 酸素借と酸素債の決定

運動後の酸素摂取量が基準線の水準に回復するまでの過剰酸素摂取量をもって酸素債とした。

酸素借の決定は以下の手順によってきめられた。まず各被検者ごとに、それぞれの運動強度の5試行の基準線を重ね合わせ、運動中の過剰酸素摂取量の水準を決定した。日時を変えての5試行の実験であったため、時間経過にしたがってのそれぞれ1分間ごとの酸素摂取量の水準は、やや差異を示したが、資料整理の段階ではそれらの平均値をもって代表させることにした。運動中の酸素摂取量の水準は4分間運動と6分間運動において $\pm 3\%$ の動揺の範囲内にあった。すなわち定常状態の酸素摂取量の水準が決定された。このようにして求めた定常状態の酸素摂取量と、定常状態に至るまでの運動中の酸素摂取量との差を酸素借として決定した(図2)。定常状態の酸素摂取量は群平均で、軽運動が $15.5 \text{ ml/kg} \cdot \text{min}^{-1}$ 、中等度の強度の運動が $23.3 \text{ ml/kg} \cdot \text{min}^{-1}$ 、そして激運動が $28.2 \text{ ml/kg} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。

結 果

1. 酸素摂取量

表3には、運動強度($\% \dot{V}O_{2\max}$)順に、それぞれの被検者が示した分時運動中の酸素摂取量、酸素借の算出値、酸素債、そして全酸素消費量がまとめられている。また、課された運動中の酸素摂取量が、 $\text{ml/kg} \cdot \text{min}^{-1}$ であらわされている(表4)。各被検者は、それぞれの運動強度で行なった5種類の試行を重ね合わせると1分目の酸素摂取量は5回、2分目は4回、3分目の運動は3

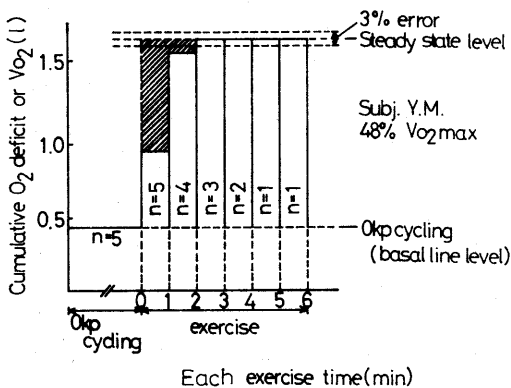


Fig. 2. How to determine of the oxygen deficit.

回、4分目は2回、それぞれ重複して測定されていることになる。表の中の数値はそれらの値の平均値をもってあらわしてある。また、5分目の酸素摂取量は、6分間運動の5分目の値を用い、6分目の酸素摂取量は最後の1分間の値をあらわしてある。

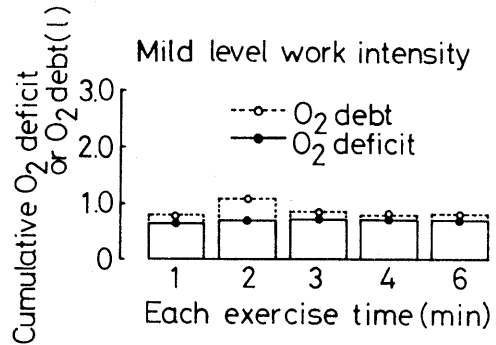


Fig. 3. Comparison of the O_2 deficit and the O_2 debt at each duration of exercise.

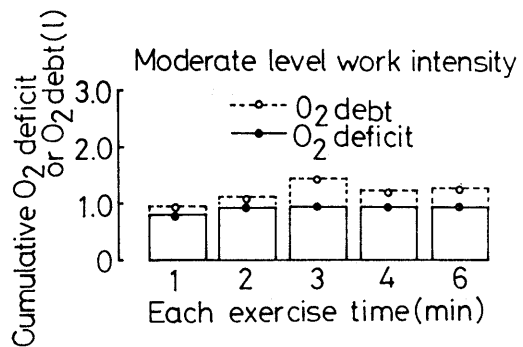


Fig. 4. Comparison of the O_2 deficit and the O_2 debt at each duration of exercise.

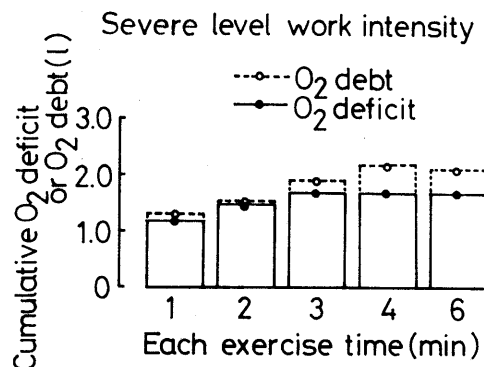


Fig. 5. Comparison of the O_2 deficit and the O_2 debt at each duration of exercise.

Table 4. Mean exceeded Oxygen uptake with each intensity and duration of exercise.

Work intensity	Work load (% $\dot{V}O_{2\max}$)	Subject	0 kp cycling (ml/kg/min) (N=5)	Each of exercise (min)					
				1 (N=5)	2 (N=4)	3 (N=3)	4 (N=2)	5 (N=1)	6 (N=1)
Mild level (N=4)	40% $\dot{V}O_{2\max}$	(T. Y.)	8.0	5.2	11.9	13.0	13.2	13.5	14.3
			0.6	0.7	0.6	0.5	0.6		
	44% $\dot{V}O_{2\max}$	(K. K.)	6.7	5.4	12.6	13.4	13.4	13.0	13.0
			0.4	0.6	0.6	0.6	0.4		
	48% $\dot{V}O_{2\max}$	(H. K.)	6.8	6.7	14.5	14.6	14.8	14.1	15.2
			0.5	0.8	1.0	0.4	0.1		
48% $\dot{V}O_{2\max}$	(Y. M.)	7.4	9.0	19.0	20.5	20.5	20.2	20.2	
		0.3	0.3	0.2	0.4	0.1			
M ₁			7.2	6.6	14.5	15.4	15.5	15.4	15.7
S.D			0.5	1.5	2.8	3.0	3.0	2.8	2.7
Moderate level (N=3)	52% $\dot{V}O_{2\max}$	(H. W.)	6.6	7.1	16.4	17.7	17.0	19.2	19.2
			0.1	1.0	0.7	1.1	0.8		
	63% $\dot{V}O_{2\max}$	(H. W.)	7.2	10.3	20.9	23.2	23.3	23.4	23.9
			0.3	0.9	1.4	1.0	0.9		
	65% $\dot{V}O_{2\max}$	(T. Y.)	7.3	9.9	22.5	23.5	23.7	24.3	26.4
			0.6	0.7	1.1	0.8	0.9		
M ₂			7.0	9.1	19.9	21.5	21.3	22.3	22.7
S.D			0.3	2.6	2.6	2.7	3.1	2.2	3.0
Severe level (N=3)	71% $\dot{V}O_{2\max}$	(Y. M.)	7.3	13.2	28.8	30.8	32.8	32.1	34.0
			0.4	1.4	1.9	1.0	0.2		
	72% $\dot{V}O_{2\max}$	(K. K.)	6.6	9.4	19.9	22.9	24.8	24.0	25.8
			0.2	0.6	0.7	1.6	1.9		
	75% $\dot{V}O_{2\max}$	(H. K.)	7.2	11.2	25.6	27.2	27.2	26.9	28.5
			0.5	1.4	0.8	0.4	0.8		
M ₃			7.0	12.3	24.7	27.0	28.2	27.7	29.0
S.D			0.3	2.0	3.9	3.5	3.6	3.4	3.4

Table 5. Mean Heart rate with each intensity and duration of exercise.

Work intensity	0 kp cycling (beats/min) (n=5)	Each exercise (min)					
		1 (n=5)	2 (n=4)	3 (n=3)	4 (n=2)	5 (n=1)	6 (n=1)
Mild level (n=4)	74.5	102.8	111.8	113.0	113.8	114.0	113.3
	9.2	6.2	8.0	9.4	10.0	11.8	8.1
Moderate level (n=3)	71.7	101.0	116.7	120.0	122.0	126.0	128.7
	4.0	3.6	6.6	8.2	8.2	10.7	12.1
Severe level (n=3)	72.7	114.3	137.7	144.7	148.0	149.0	152.0
	3.9	4.5	2.6	3.4	1.6	4.6	4.2

(beats/min)

再区分を行なった3群の運動強度ごと全被検者についての測定値の平均を求め比較してみると、軽運動では2分間運動からほぼ一定の数値を示すようになる。中等度の運動の強度では、3分間運動から一定となり、また激運動では4分間運動に至ってはほぼ一定値を示すようになる。

2. 心拍数

各運動時間に対する心拍数を表5に示した。基準線を求める0kpのベダリング運動では、心拍数は71.7～74.5拍/分を示す。また、課された運動中の心拍数は1分間運動で100拍/分以上になり、軽運動では3分間運動から113～114拍/分の一定の数値を示し、中等度の強度の運動では5分間運動から126拍/分とやや安定し、激運動では上昇を続けている。

3. 分時運動に対する酸素借と酸素債

表3には、それぞれの被検者について各分時運動ごとの酸素借と酸素債およびそれらの比率がまとめられている。酸素借が一定値を示すようになるのは、それぞれの時間までの酸素不足の値の累積値をあらわすからであり、数値が変わらないということは定常状態に入ったという意味になる。また、酸素債は負荷の強度によって最大値のあらわれる分時が異なることがわかる。

考 察

この研究の目的であった酸素借と酸素債の関係をみると軽運動では、酸素借の累積値は2分目から一定値(723±70.8 ml)を示す。酸素債は2分間運動で差が大きくなり再び酸素借の水準にもどるのである。

中等度の強度の運動(52～65% $\dot{V}O_{2max}$)をみると酸素借の累積値は3分間運動から一定水準に達するが、酸素債は運動開始から徐々に増加し3分間運動で最高値(1483.3±321.3 ml)を示し、4分間運動ではやや低下を示すが、酸素借の水準までもどらずある水準で一定値を保ち、両者の間にやや差を示している。

激運動(71～75% $\dot{V}O_{2max}$)では、前2者と相を異にしている。酸素借の累積値は3分目の運動(1737.3±415.6 ml)まで漸次上昇し、その後一定値を示すが、酸素債は4分目の運動まで上昇を続け、その後やや低下を示す。しかし、酸素借の値とは明らかな差を生じている。

Wasserman (1970) らは、685 kg/min の一定な運動負荷を課し、本研究と同様のことを調べている。この作業強度は自転車エルゴメーターの負荷のほぼ2kpに相当するが、酸素借の累積値は3分あるいは4分に一定値

になり、4分目以後は酸素借と酸素債の累積値がほぼ同値を示した¹⁰⁾と報告している。これは、われわれの軽運動での測定結果に類似している。

これまで、定常状態のあらわれる運動では酸素借と酸素債は等しいというのが定説である。しかし、運動開始の数分間を酸素借と酸素債の関連からみていくと必ずしも一致を示さないのである。この現象が一義的に死点または、次息と呼ばれ概念と一致するとはいえないが、本研究で明らかになったこの現象が心理的・生理的観点から接近するときの大きな手掛りになるのではないかと思われる。

70% $\dot{V}O_{2max}$ 以上の激運動の強度では、酸素債は漸次増加し、一定の水準を維持しているようにみえる。これは、運動強度が高いため見かけの定常状態があらわれ酸素債の酸素借に対する差異のあらわれを運動初期の無酸素過程での乳酸産生と考えると、その乳酸が蓄積したままで消去されない動態を示していると考えられよう。

各運動強度は軽運動で50% $\dot{V}O_{2max}$ 、中等度の運動では60% $\dot{V}O_{2max}$ 、激運動では73% $\dot{V}O_{2max}$ となる。これらの運動強度にしたがい酸素借の一定になる水準は、軽運動強度で0.72 l、中等度の運動強度で0.95 l、激運動強度では1.74 lと指数関数的に増加している。

Knuttger と Saltin (1972) は酸素借の累積値が1.2 l～1.5 lを越えると筋中乳酸濃度は増加すると報告している^{9,10)}。このことから本研究の激運動の強度では筋中乳酸の蓄積が十分推察されるところである。

筆者らは、本研究において、運動適応のための初期現象の中で酸素借と酸素債の一時的離反は乳酸が筋中に発生するが、これが血中に移行するに及び呼吸を促進させ、酸一塩基平衡(重炭酸緩衝系)の作用機序の緩衝が始まると考えている。酸性化に対する緩衝作用は血液でばかりでなく肝臓などの組織が介在しよう。恒常性が保たれれば酸素借と酸素債とのある差異をもって維持される中等度の運動強度の場合、あるいは酸性化の優勢は酸素債の増加(激運動の場合)をもたらすことは当然である。

要 約

3種類の運動強度を選び、運動の開始時におけるそれら強度に対する酸素借と酸素債の関係が調べられた。

予測運動強度は40%と60%の $\dot{V}O_{2max}$ 水準であったが、実測したところ、軽運動(40～50% $\dot{V}O_{2max}$)、中等度の運動(50～60% $\dot{V}O_{2max}$)、そして、激運動(65～75% $\dot{V}O_{2max}$)に区分された。

被検者は自転車エルゴメーター (60 rpm) によって 1 分間運動とその回復過程, 2 分間運動とその回復過程, 3 分間運動とその回復過程, 4 分間運動とその回復過程, そして 6 分間運動とその回復過程における酸素摂取量が測定され, それらを重複させてそれぞれの運動時間の酸素借が算出された。それらと実測されたそれぞれの酸素債が比較された。

その結果, 累積された酸素借は運動強度が大きくなるにつれて大きくなり, 時間の延長がみられた。

運動強度が大きくなると酸素債は大きくなる。それぞれの運動強度での酸素借と比較すると, 両者の間の差異があらわれる時期が認められた。この差異のあらわれる時期は運動強度が大きくなるにつれて時間的遅延を示した。これらのことから, 運動開始時には運動強度に応じて, 乳酸性無酸素過程が生じることが推察されよう。したがって, 運動開始の初期過程では酸-塩基平衡の作用機序が動員されることが示唆される。

文 献

- 1) Bason, R., C.E. Billings, E.L. Fox and R. Gerke: Oxygen kinetics for constant work loads at various altitudes. *J. Appl. Physiol.*, **35** (4): 497-500, 1973.
- 2) Cowan, C.R. and O.S. Solandt: The duration of the recovery period following strenuous muscular exercise, measured to a base line of steady, mild exercise. *J. Physiol.*, **89**: 462-466, 1937.
- 3) Hill, A.V., C.N.H. Lough and H. Lupton: Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. Parts IV-VI, *Proc. Roy. Soc.*, **B. 97**: 84-138, 1925.
- 4) Hickson, R.C., H.A. Bomze and J.O. Holloszy: Faster adjustment of O₂ uptake to the energy requirement of exercise in the trained state. *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **44** (6): 877-881, 1978.
- 5) Hagberg, J.M., F.J. Nagle and J.L. Carlson: Transient O₂ uptake response at the onset of exercise. *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **44** (1): 90-92, 1978.
- 6) Hagberg, J.M., R.C. Hickson, A.A. Ehsani and J.O. Holloszy: Faster adjustment to and recovery from submaximal exercise in the trained state. *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **48** (2): 218-224, 1980.
- 7) Karpovich, P. and W. Sinning: Physiology of muscular activity (7th ed.) 石河利寛訳, ベースボールマガジン社, 1976.
- 8) Krogh, A. and J. Lindhart: The regulation of respiration and circulation during the initial stages of muscular work. *J. Physiol.*, **47**: 112-136, 1913.
- 9) Krogh, A. and J. Lindhart: The changes in respiration at the transition from work to rest. *J. Physiol.*, **53**: 431-437, 1920.
- 10) Knuttgen, H.G. and B. Saltin: Muscular metabolites and oxygen uptake in short term submaximal exercise in man. *J. Appl. Physiol.*, **32** (5): 690-694, 1972.
- 11) Kuntzen, H.G.: Oxygen debt after submaximal physical exercise. *J. Appl. Physiol.*, **29** (5): 651-657, 1970.
- 12) 真島英信: 生理学, 文光堂, (16 版), 1978.
- 13) Martim, T.P.: Oxygen deficit, oxygen debt relationship at submaximal exercise. *J. Sports Med.*, **14**: 252-257, 1974.
- 14) McMiken, D.F.: Oxygen deficit and repayment in submaximal exercise. *Europ. J. Appl. Physiol.*, **35**: 127-136, 1976.
- 15) Prampero, P.E. DI., C.T.M. Davies, P. Cerretelli and R. Margaria: An analysis of O₂ debt contracted in submaximal exercise. *J. Appl. Physiol.*, **29** (5): 541-551, 1970.
- 16) Pearce, D.H. and H.T. Milhorn, Jr.: Dynamic and steady-state respirator response to bicycle exercise. *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **42** (6): 959-967, 1977.
- 17) Wasserman, K., A.L.V. Kessel and G.G. Burton: Interaction of physiological mechanisms during exercise. *J. Appl. Physiol.*, **22** (1): 71-85, 1967.
- 18) Whipp, B.J., C. Seard and K. Wasserman: Oxygen deficit-oxygen debt relationships and efficiency of anaerobic work. *J. Appl. Physiol.*, **28** (4): 452-456, 1970.
- 19) Whipp, B.J.: Rate constant for the kinetics of oxygen uptake during light exercise. *J. Appl. Physiol.*, **30** (2): 261-263, 1971.
- 20) Whipp, B.J., L.B. Diamond, R. Casaburi, K. Wasserman: Kinetics of gas exchange and ventilation in transitions from rest or prior exercise. *J. Appl. Physiol.*, **43** (4): 704-708, 1977.
- 21) Whipp, B.J. and K. Wasserman: Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. *J. Appl. Physiol.*, **33** (3): 351-356, 1972.
- 22) 吉田 稔, 関 雅彦: Steady state. 呼吸と循環. **27** 巻 3 号: 257-262, 1979.